

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beban Struktur

Beban pada struktur bangunan merupakan salah satu hal terpenting dalam perencanaan sebuah gedung. Struktur yang akan dirancang harus kuat, aman, fleksibel dan mudah dalam pengerjaannya. Analisis struktural merupakan bagian yang sangat penting karena beban dari struktural dapat menyebabkan stress, deformasi, dan pemindahan yang dapat mengakibatkan munculnya masalah struktural bahkan sampai terjadi kegagalan. Peraturan bangunan mengharuskan struktur yang dirancang dan dibangun dapat menahan semua jenis beban yang kemungkinan akan dihadapi selama siklus hidupnya.

Menurut pedoman perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung (PPIUG) 1987 beban yang bekerja pada suatu struktur bangunan dapat diklasifikasikan kedalam beberapa kategori antara lain adalah beban mati (DL), beban hidup (LL), beban angin (W), dan beban gempa (E). Berikut ini merupakan penjelasan dari beban-beban tersebut:

2.1.1 Beban Mati

Berdasarkan SNI 1727:2013 beban mati merupakan berat semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, dinding, balok, kolom, atap, plafon, *finishing*, mesin-mesin, dan peralatan yang tak terpisahkan dari gedung tersebut. Beban mati dari suatu merupakan berat sendiri struktur yang disebabkan oleh adanya gravitasi bumi. Beban ini hanya bekerja dengan arah vertical ke bawah secara terus menerus dalam struktur. Perhitungan beban mati pada struktur berdasarkan berat satuan material dan volume elemen tersebut. Sebelum dilakukan perencanaan struktur, beban mati terlebih dahulu kemudian dilakukan perhitungan pembebanan sesuai dengan berat dan volume dari elemen.

Beban mati secara teori harus dihitung dengan tingkat akurasi yang tinggi. Namun, insinyur struktural terkadang konservatif dengan perkiraan mereka, meminimalkan potensi defleksi, memungkinkan *margin or error* dan

memungkinkan untuk terjadi perubahan dari waktu ke waktu, dan desain beban mati seringkali jauh melebihi yang dialami dalam praktek.

Tabel 2.1 Beban mati bahan bangunan dan komponen gedung

Bahan Bangunan	Berat
Baja	7850 kg/m ³
Beton	2200 kg/m ³
Beton Bertulang	2400 kg/m ³
Kayu (kelas I)	1000 kg/m ³
Pasir (kering udara)	1600 kg/m ³
Komponen Gedung	
Spesi dari semen, per cm tebal	21 kg/m ²
Dinding bata merah ½ batu	250 kg/m ²
Penutup atap genting	50 kg/m ²
Penutup lantai ubin semen per cm tebal	24 kg/m ²

Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1987

2.1.2 Beban Hidup

Berdasarkan SNI 1727:2013 beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pemakaian atau penghunian suatu gedung yang bersifat berpindah-pindah dan tidak tetap. Termasuk beban penggunaan adalah beban berat manusia dan beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah sewaktu-waktu. Beban yang diakibatkan oleh salju atau air hujan juga termasuk ke dalam beban hidup. Semua beban hidup memiliki karakteristik dapat berpindah atau bergerak. Secara umum beban ini bekerja dengan arah vertikal ke bawah, namun terkadang dapat juga berarah horizontal. Beban hidup dapat terkonsentrasi atau terdistribusi dan mungkin melibatkan benturan, getaran atau akselerasi.

Beberapa beban hidup dapat memberikan beban secara permanen sedangkan lainnya hanya bekerja sekejap. Berat dan kepadatan dari beban hidup tidak dapat diketahui secara pasti, maka besar yang sebenarnya dari beban ini sulit untuk ditentukan. Oleh karena itu, untuk memperoleh keamanan gedung yang memadai beban hidup yang digunakan sebagai beban kerja dalam perencanaan ditetapkan oleh peraturan bangunan dari pemerintah.

Tabel 2.2 Beban hidup pada lantai gedung

Komponen Bangunan	Berat
Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana	125 kg/m ²
Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama, rumah sakit	250 kg/m ²
Lantai ruang olahraga	400 kg/m ²
Lantai pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, ruang mesin	400 kg/m ²
Lantai gedung parkir bertingkat, untuk lantai bawah	800 kg/m ²

Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1987

2.1.3 Beban Angin

Berdasarkan SNI 1727:2013 beban angin merupakan beban yang berkerja pada bangunan karena adanya selisih tekanan udara. Beban angin berpengaruh terhadap lokasi dan tinggi suatu bangunan. Beban angin dapat diterapkan oleh pergerakan udara relatif terhadap stuktur dan analisis mengacu pada pemahaman meteorologi dan aerodinamika serta struktur. Beban angin mungkin tidak menjadi perhatian yang lebih pada bangunan kecil, masif, tingkat rendah. Untuk gedung-gedung yang dianggap tinggi, beban angin harus diperhitungkan karena akan berpengaruh terhadap simpangan gedung (*story drift*) dan penulangan geser. Selain ketinggian, beban angin juga penting pada bangunan yang menggunakan material lebih ringan dan menggunakan bentuk yang mempengaruhi aliran udara biasanya bentuk atap. Intensitas tekanan tiup yang direncanakan dapat diambil minimum sebesar 25 kg/m², kecuali untuk kondisi berikut ini:

1. Tekanan tiup di tepi laut sampai sejauh 5 km dari pantai harus diambil minimum 40 kg/m².
2. Untuk bangunan di daerah lain yang kemungkinan tekanan tiupnya lebih dari 40 kg/m², harus diambil sebesar $p = V^2 / 16$ (kg/m²), dengan V adalah kecepatan angin dalam m/s.
3. Untuk cerobong, tekanan tiup dalam kg/m² harus ditentukan dengan rumus $(42,5 + 0,6h)$, dengan h adalah tinggi cerobong seluruhnya dalam meter.

Nilai tekanan tiup yang diperoleh masih harus dikalikan dengan suatu koefisien angin, guna mendapatkan gaya resultan yang bekerja pada struktur.

2.1.4 Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1727:2013 beban gempa merupakan beban yang diakibatkan oleh adanya pergerakan tanah akibat proses alami dibawah struktur suatu gedung atau bangunan, maka perlu diperhatikan sebagai berikut:

1. Setiap struktur gedung bertingkat direncanakan dan dilaksanakan agar mampu menahan suatu beban dasar akibat gempa (V), dengan persamaan:

$$V = C_s \cdot W \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

C_s = Koefisien respon seismik

W = Berat seismik efektif

Yang mana C_s dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan

S_{DS} = parameter percepatan spektrum respons desain pada periode pendek 0,2 detik

R = faktor modifikasi respons

I_e = faktor keutamaan

2. Nilai C_s dihitung dalam persamaan 2.2 tidak melebihi:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dan tidak boleh kurang dari:

$$C_s = 0,044 \cdot S_{DS} \cdot I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk struktur dengan lokasi yang memiliki nilai S_I sama dengan atau lebih besar dari 0,6 g, maka C_s tidak boleh kurang dari:

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.5)$$

3. Pendistribusian gaya geser dasar seismik ke semua tingkat menjadi gaya gempa lateral (F_x) dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \dots\dots\dots (2.6)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan

C_{vx} = faktor distribusi vertikal

V = gaya geser dasar seismik

w_i, w_x = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang dikenakan pada tingkat i atau x

h_i, h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x

k = eksponen yang terkait dengan periode struktur

3. Selanjutnya pada setiap elemen vertikal dari sistem penahan gaya seismik pada tingkat yang di tinjau harus didistribusikan geser tingkat desain gempa (V_s), dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_s = \sum_{i=x}^n F_i \dots\dots\dots (2.8)$$

4. Untuk diafragma kaku, distribusi gaya lateral pada masing-masing tingkat harus memperhitungkan pengaruh momen torsi bawaan (M_t) dengan persamaan sebagai berikut:

$$M_t = V_x \cdot e \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan:

V_x = geser pada tingkat x di tiap arah yang ditinjau

e = eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan

5. Gaya seismik lateral (F_x) akan menghasilkan momen guling (M_x) dengan persamaan:

$$M_x = \tau \sum_{i=1}^n F_i (h_i - h_x) \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan:

F_i = bagian dari gaya geser dasar pada lantai i

h_i, h_x = tinggi dari dasar ke lantai i dan x

τ = koefisien reduksi momen guling

= 1,0 untuk 10 lantai teratas

= 0,8 untuk lantai ke-20 dari atas dan bawah

Diizinkan menggunakan nilai τ sama dengan 1,0 untuk keseluruhan lantai

2.1.5 Beban Terfaktor

Beban terfaktor menurut SNI 1727:2013 tentang beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain, maka digunakan kombinasi pembebanan sebagai berikut:

- a. $1,4D$
- b. $1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
- c. $1,2D + 1,6L (L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
- d. $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
- e. $1,2D + 1,0E + L$
- f. $0,9D + 1,0W$
- g. $0,9D + 1,0E$

Dimana:

D = beban mati

L = beban hidup

L_r = beban hidup atap

R = beban hujan

W = beban angin

E = beban gempa

Berikut ini merupakan beberapa catatan tambahan untuk kombinasi beban:

1. Nilai faktor beban L dalam persamaan c , d , dan e dapat direduksi menjadi $0,5L$, jika nilai $L < 4,8 \text{ kN/m}^2$ (atau 500 kg/m^2) disamping itu faktor tersebut tidak boleh direduksi di area garasi atau tempat publik.
2. Jika beban angin (W) belum direduksi oleh faktor arah, maka faktor beban untuk beban angin dalam persamaan d harus diganti menjadi $1,6$ dan dalam persamaan c diganti menjadi $0,8$.
3. Unsur beban fluida untuk struktur yang memikul beban fluida dapat dimasukkan persamaan a hingga e dan g dengan faktor beban yang sama dengan faktor beban mati.
4. Jika terdapat pengaruh tekanan tanah lateral (H), maka ada tiga kemungkinan yang terjadi yaitu sebagai berikut:

- a. Apabila H bekerja sendiri atau menambah efek dari beban-beban lainnya, maka H harus dimasukkan dalam kombinasi pembebanan dengan faktor beban sebesar 1,6.
- b. Apabila H permanen dan bersifat melawan pengaruh dari beban-beban lainnya, maka H dapat dimasukkan dalam kombinasi pembebanan dengan menggunakan faktor beban sebesar 0,9.
- c. Apabila H bersifat tidak permanen, namun pada saat H bekerja mempunyai sifat melawan beban-beban lainnya, maka beban H boleh tidak dimasukkan dalam kombinasi pembebanan.

2.2 Elemen Struktur

Struktur mempunyai beberapa elemen yang mempunyai fungsi masing-masing yang saling terangkai menjadi satu kesatuan yaitu bangunan konstruksi. Untuk merangkai elemen struktur menjadi satu kesatuan bangunan yang baik, maka dibutuhkan pengetahuan mengenai klasifikasi pada struktur baik dari bentuk maupun fungsinya. Berikut ini merupakan penjelasan mengenai elemen struktur sederhana yang pada umumnya digunakan pada bangunan struktur.

2.3 Pelat

Menurut Dipohusodo (1994) pelat merupakan panel-panel beton bertulang, dua atau satu arah saja yang bergantung pada sistem strukturnya. Umumnya pelat lantai menerus dan dicetak menjadi satu kesatuan monolit dengan balok anak dan balok induk. Tebal dari pelat kemungkinan lebih kecil dibandingkan dengan panjang atau lebarnya. Pelat beton ini sangat kaku dan arahnya yang horizontal maka pelat ini berfungsi sebagai elemen pengaku atau diafragma yang berguna untuk mendukung peran balok portal bangunan. Struktur dari pelat biasanya dimodelkan oleh elemen solid 3D, tetapi elemen solid membutuhkan banyak elemen solid untuk menghitung tegangan normal dan tegangan geser dalam arah tebal dimana hal ini diabaikan untuk pelat tipis. Pelat dibagi menjadi dua macam dari segi struktur atas yaitu sebagai berikut:

2.3.1 Pelat Satu Arah

Pelat satu arah merupakan pelat sederhana yang dapat dianalisa dengan teori mekanika teknik yang didasarkan pada teori elastis linier. Menurut Yunan dan Zamzami (2005) pelat satu arah dapat bersifat statis tertentu atau statis tak tentu. Pelat yang menggunakan besi tulangan pokok yang melajur satu arah ini banyak ditemukan pada bangunan yang lebih mendominasi menahan beban yang merupakan lentur pada bentang yang arahnya satu saja. Contoh dari pelat satu arah adalah pelat kantilever dan pelat yang ditumpu oleh 2 tumpuan.

Momen lentur yang bekerja pada bidang adalah satu arah yaitu dalam arah rentang L . Pegas yang diperkuat peregangan dipasang dalam satu arah saja karena untuk menjaga posisi tulangan tidak berubah atau bergeser saat pengecoran beton. Posisi dasar dan penguatan selalu berpotongan tegak lurus dan dipasang berdekatan dengan tepi luar, sementara tulangan dipasang di bagian dalam dan diletakkan pada penguatan dasar. Tepat di lokasi salib, dua bala bantuan terikat erat dengan kawat bendrat. Fungsi penguat adalah untuk memperkuat posisi tulangan utama serta penguatan untuk menahan beton retak karena penyusutan dan perbedaan suhu pada beton.

2.3.2 Pelat Dua Arah

Pelat dua arah merupakan pelat yang apabila dibandingkan sisi panjang terhadap sisi pendek kurang dari sama dengan dua, dan lentur yang terjadi timbul di arah yang saling bersilangan (tegak lurus). Karena momen lentur bekerja dalam dua arah, yaitu dalam arah span (L_x) dan span (L_y), penguatan dasar juga dipasang dalam dua arah vertikal, sehingga tidak perlu untuk penguatan.

2.3.3 Pembatasan Tebal Pelat

1. Pelat Satu Arah

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 9 ayat 5.2 kriteria tinggi balok dan pelat dikaitkan dengan bentangnya dalam rangka untuk membatasi lendutan besar yang dapat mengganggu kemampuan kelayakan kinerja atau kinerja struktur pada beban bekerja. Penentuan tebal pelat terlentur satu arah tergantung pada beban atau momen lentur yang bekerja, defleksi yang terjadi, dan kebutuhan kuat geser.

Tabel 2.3. Tebal minimum balok dan pelat satu arah

Komponen Struktur	Tebal Minimum, h			
	Dua Tumpuan	Satu Ujung Menerus	Kedua Ujung Menerus	Kantilever
Komponen tidak mendukung atau menyatu dengan partisi atau konstruksi lain yang akan merusak akibat lendutan besar				
Pelat masih satu arah	1/20	1/24	1/28	1/10
Balok atau pelat rusuk satu arah	1/16	1/18,5	1/21	1/8

(Sumber: SNI 2847:2013)

2. Pelat Dua Arah

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 9 ayat 5.3.3 tebal pelat dua arah dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

- a. Penentuan tebal pelat dua arah jika α_m lebih besar dari 0,2 tapi tidak lebih dari 2,0 menggunakan rumus sebagai berikut:

$$h = \frac{\ln(0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)} \dots\dots\dots (2.11)$$

- b. Jika nilai α_m lebih besar dari 2,0, maka tebal pelat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$h = \frac{\ln(0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 9\beta} \dots\dots\dots (2.12)$$

- c. Untuk mencari nilai dari a_{fm} dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$a_{fm} = \frac{a_{fl} + a_{fs}}{2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$a_{fl} = \frac{EI_b}{EI_l} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$a_{fs} = \frac{EI_b}{EI_s} \dots\dots\dots (2.15)$$

- d. Sedangkan untuk mencari nilai rasio bentang bersih dari arah panjang terhadap arah pendek dari pelat dua arah yaitu dengan persamaan:

$$\beta = \frac{L_y}{L_x} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dengan:

l_n = panjang bentang bersih

β = rasio bentang bersih

a_{fm} = nilai rata-rata a_f

a_f = rasio kekakuan lentur penampang balok

I_b = momen inersia bruto dari penampang balok

I_s = momen inersia bruto dari penampang pelat

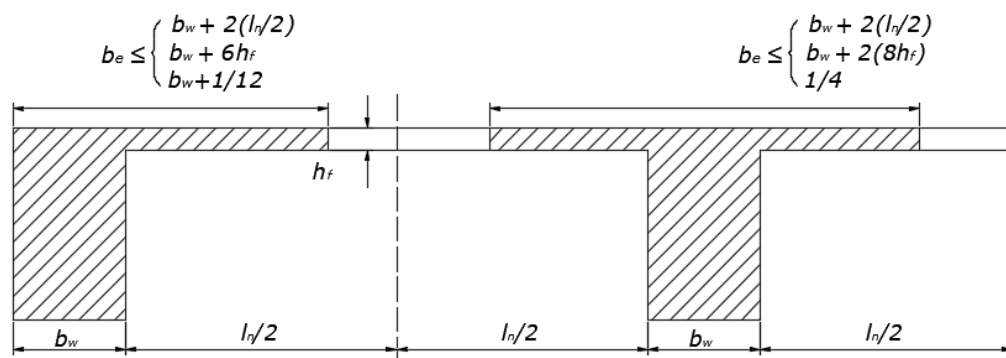
2.4 Balok

Balok merupakan elemen struktur yang berfungsi menyalurkan beban dari pelat ke kolom. Umumnya elemen balok dicor secara monolit dengan pelat atau slab, dan secara struktural diberi tulangan di bagian bawah dan bagian atas penampang. Berdasarkan pengalaman Yunan dan Zamzami (2005) perencanaan dimensi balok diambil sebesar 1/12 sampai dengan 1/15 dari bentang balok, sedangkan lebar balok dapat diambil sebesar 1/2 sampai dengan 2/3 dari tinggi balok tergantung dari besarnya beban yang bekerja di atasnya.

Beton akan mengalami retak akibat tarik, oleh karena itu dibutuhkan tulangan baja untuk memikul tegangan tarik yang ditimbulkan oleh momen lentur, gaya aksial maupun efek susut pada beton. Suatu balok yang tertumpu sederhana memikul beban merata akan mengalami momen lentur. Karena momen lentur yang timbul adalah momen positif, maka pada sisi bawah balok akan timbul tegangan lentur tarik serta retak-retak minor.

2.4.1 Balok Penampang T dan L

Suatu balok penampang T yang mengalami kondisi lentur pada bagian lapangan terjadi momen positif, sisi bawah balok mengalami tarik sedangkan sisi atas balok mengalami tekan (Setiawan, 2016). Maka sayap dari balok akan berfungsi sebagai daerah tekan beton. Dalam kasus ini, daerah tekan beton dapat berupa persegi atau juga dapat berupa penampang T. Pada bagian tumpuan terjadi momen negatif, yang mengakibatkan sisi atas balok mengalami tarik dan sisi bawah balok mengalami tekan. Sehingga daerah dari tekan beton dapat dipastikan berupa penampang persegi.



Gambar 2.1 Syarat lebar efektif balok T dan L (Sumber: Setiawan, 2016:56)

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 8.12 untuk menentukan lebar efektif balok T dan balok L dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Untuk balok T

$$b_e \leq 16 h_f + b_w \quad (2.17)$$

$$b_e \leq l_n + b_w \quad (2.18)$$

$$b_e \leq \frac{1}{4} L \quad (2.19)$$

2. Untuk balok L

$$b_e \leq 6 h_f + b_w \quad (2.20)$$

$$b_e \leq \frac{1}{2} l_n + b_w \quad (2.21)$$

$$b_e \leq \frac{1}{12} L + b_w \quad (2.22)$$

Dimana:

b_w = lebar balok

L = bentang balok

l_n = jarak bersih antar balok

h_f = tebal pelat

Dalam merencanakan desain balok T menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Jika d diketahui dan mencari nilai A_s

a. Menghitung kuat momen dari sayap dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi M_{nf} = \phi (0,85 f_c') b h_f (d - h_f/2) \quad (2.23)$$

jika $M_n > \phi M_{nf}$ maka $a > h_f$. jika $M_u < \phi M_{nf}$, maka $a < h_f$ dan penampang dapat di desain seperti balok persegi.

- b. Jika $a < h_f$, maka ρ dihitung dengan menggunakan persamaan 2.41 dan $A_s = \rho.b.d$. periksa bahwa $\rho \geq \rho_{min}$

- c. Jika $a > h_f$, menentukan A_{sf} dengan persamaan:

$$A_{sf} = 0,85.f_c.(b - b_w)h_f/f_y \dots\dots\dots (2.24)$$

$$M_{u2} = \phi A_{sf}f_y(d - h_f/2) \dots\dots\dots (2.25)$$

Momen yang dipikul bagian badan adalah:

$$M_{u1} = M_u - M_{u2} \dots\dots\dots (2.26)$$

- d. Menghitung nilai ρ_1 menggunakan m_{u1} , b_w dan d dengan persamaan 2.41 dan menentukan $A_{s1} = \rho_1.b_w.d$:

$$A_s = A_{s1} + A_{sf} \dots\dots\dots (2.27)$$

Lalu memeriksa $A_s \leq A_{s maks}$, dan $\rho_w = A_s/(b_w.d) \geq \rho_{min}$

- e. Jika $a = h_f$, maka $A_s = \phi(0,85f_c')b.h_f/f_y$

2. Jika d dan A_s sama-sama belum diketahui

- a. Asumsikan $a = h_f$ dan hitung luas tulangan yang diperlukan untuk memikul gaya tekan di seluruh penampang sayap dengan persamaan:

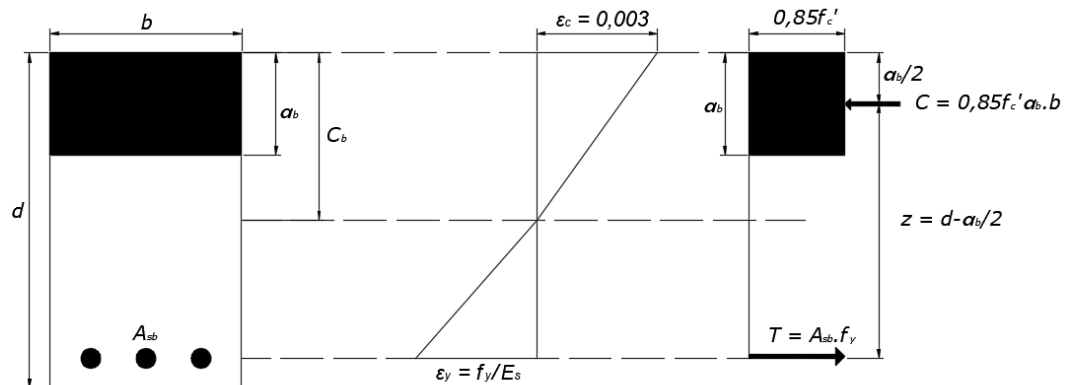
$$A_{sft} = \frac{0,85f_c'.b.h_f}{f_y} \dots\dots\dots (2.28)$$

- b. Menghitung nilai d berdasarkan pada A_{sft} dan $a = h_f$ dari persamaan berikut ini:

$$M_u = \phi A_{sft}f_y(d - h_f/2) \dots\dots\dots (2.29)$$

2.4.2 Perencanaan Penampang Persegi Tulangan Tunggal

Menurut Setiawan (2016:35) penampang persegi dengan penulangan tunggal atau kondisi seimbang terjadi apabila tulangan baja luluh pada saat beton mencapai regangan ultimitnya sebesar 3.10^{-3} yang berarti pada saat itulah tulangan baja mencapai regangan luluhnya $\epsilon_y (f_y/E_s)$.



Gambar 2.2 Penampang persegi pada kondisi seimbang (Sumber: Setiawan, 2016:36)

Berdasarkan diagram regangan pada gambar 2.2, maka dengan menggunakan perbandingan segitiga akan diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\frac{C_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + f_y/E_s} \quad (2.30)$$

atau jika nilai E_s sebesar 200.000 MPa, maka:

$$C_b = \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) d \quad (2.31)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya, maka dapat diperoleh persamaan:

$$C = T$$

$$0,85.f'_c'.a_b.b = A_{sb}.f_y \quad (2.32)$$

Atau jika dituliskan untuk nilai a_b :

$$a_b = \frac{A_{sb} \times f_y}{0,85.f'_c' \times b} \quad (2.33)$$

Presentase tulangan yang dibutuhkan untuk memperoleh kondisi seimbang disebut rasio tulangan seimbang, p_b . Nilai p_b didapatkan dari persamaan berikut:

$$p_b = \frac{A_{sb}}{b \times d} \quad (2.34)$$

Substitusi nilai A_{sb} kedalam persamaan 2.32:

$$0,85.f'_c'.a_b.b = f_y.p_b.b.d \quad (2.35)$$

Atau

$$p_b = \frac{0,85.f'_c'}{d \times f_y} \times a_b = \frac{0,85.f'_c'}{d \times f_y} \times \beta_1 \times c_b \quad (2.36)$$

Selanjutnya disubstitusikan nilai c_b dari persamaan 2.31, untuk mendapatkan persamaan umum rasio tulangan seimbang p_b :

$$p_b = 0,85x\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600x f_y} \right) \dots\dots\dots (2.37)$$

Secara umum, momen nominal dari suatu balok persegi dengan tulangan tunggal dihitung dengan cara mengalikan nilai C atau T pada gambar 2.2 dengan jarak antar kedua gaya tersebut. Maka diperoleh persamaan:

$$M_n = C.Z = T.Z \dots\dots\dots (2.38)$$

Atau

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.39)$$

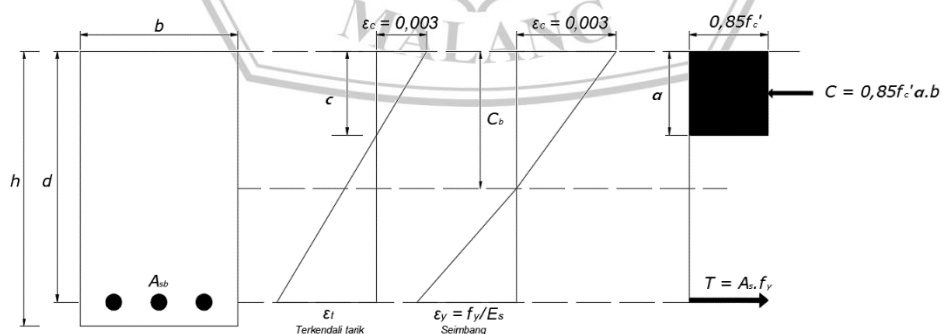
Nilai a , dihitung lebih terlebih dahulu dari persamaan 2.33 untuk mendapatkan besarnya kuat rencana, ϕM_n , maka kuat momen nominal, M_n , harus direduksi dengan cara dikalikan dengan faktor reduksi ϕ . Persamaannya adalah:

$$\phi M_n = \phi A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = \phi A_s \cdot f_y \left(d - \frac{A_s x f_y}{1,7 \cdot f'_c x b} \right) \dots\dots\dots (2.40)$$

Nilai $A_s = \rho \cdot b \cdot d$, maka didapatkan ρ dengan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4M_u}{1,7 \phi f'_c \cdot b \cdot d^2}} \right] \dots\dots\dots (2.41)$$

Selanjutnya akan ditinjau batasan presentase tulangan baja yang diizinkan dalam suatu komponen struktur lentur, balok persegi bertulangan tunggal. Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 10.3.5 disyaratkan bahwa nilai $\varepsilon_t \geq 0,004$.



Gambar 2.3 Penampang seimbang dan penampang terkendali tarik (Sumber: Setiawan, 2016:58)

Regangan penampang pada kondisi seimbang ditunjukkan pada gambar 2.3 dengan persamaan:

$$c_b = \frac{a_b}{\beta_1} = \frac{A_{sb} x f_y}{0,85.f'_c x b} = \frac{\rho_b x f_y x d}{0,85.f'_c x b} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$c = \frac{\rho x f_y x d}{0,85.f'_c x b} \dots\dots\dots (2.43)$$

Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan perbandingan antar c dan c_b :

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \frac{c_b}{d} \dots\dots\dots (2.44)$$

Dari gambar 2.3 didapatkan persamaan dengan menggunakan perbandingan segitiga:

$$\frac{c}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \varepsilon_t} \dots\dots\dots (2.45)$$

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_s}{E_s}} \dots\dots\dots (2.46)$$

Persamaan 2.44 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.46:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + \frac{f_s}{E_s}}{0,003 + \varepsilon_t} \dots\dots\dots (2.47)$$

Sehingga didapatkan nilai ρ_{maks} dengan persamaan:

$$\rho_{maks} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_s}{E_s}}{0,008} \right) \rho_b \dots\dots\dots (2.48)$$

Jika tulangan baja mempunyai $f_y = 400$ MPa dan $E = 200.000$ MPa, maka $\rho_{maks} = 0,625. \rho_b$

2.4.3 Perencanaan Penampang Persegi Tulangan Rangkap

Menurut Dipohusodo (1994:87) penampang persegi dengan penulangan tarik dan tekan dinamakan juga penampang bertulangan rangkap. Karena beton cukup kuat untuk menahan tekan maka penulangan didaerah tekan perennanya tidak sebesar didaerah tarik.

Dalam menganalisis balok beton bertulangan rangkap, biasanya terdapat dua kasus yang berbeda tergantung pada kondisi tulangan tekannya. Apakah tulangan tekan tersebut sudah luluh atau belum.

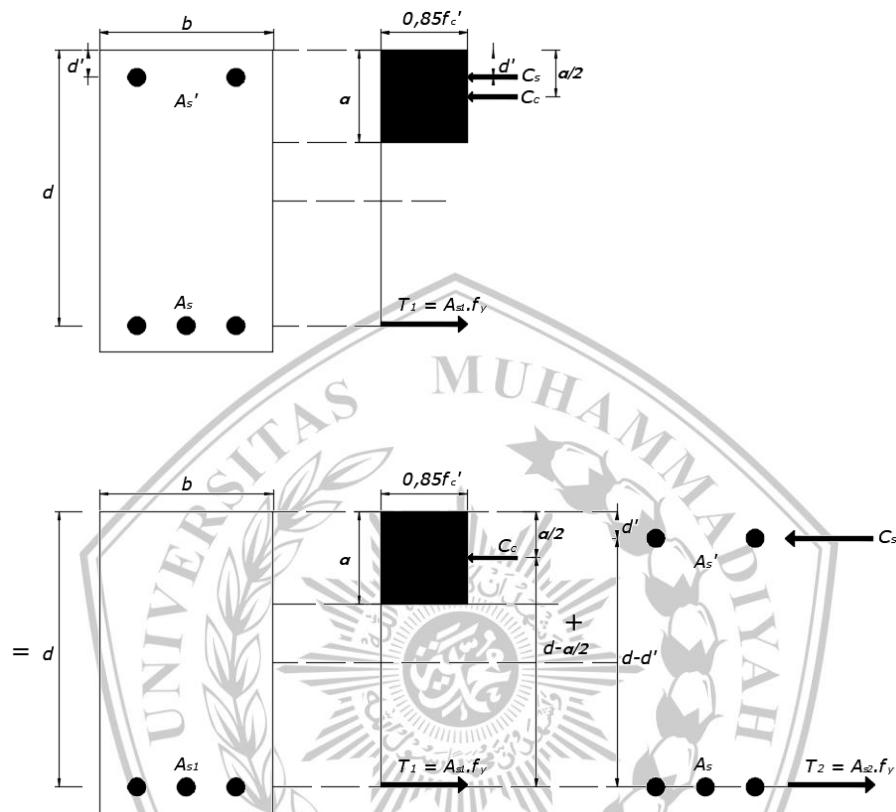
Pada tulangan tekan yang sudah luluh didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$T_l = C_c$$

$$A_{sl}.f_y = 0,85.f'_c'.a.b$$

$$a = \frac{A_{s1}f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots \dots \dots (2.49)$$

$$M_{u1} = \phi A_{s1}f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (2.50)$$



Gambar 2.4 Penampang persegi dengan tulangan rangkap (Sumber: Setiawan, 2016:48)

Syarat batasan tulangan untuk A_{s1} yang harus dipenuhi adalah $p_1 (A_{s1}/b \cdot d) < p_{maks}$ untuk penampang terkendali tarik dari balok bertulang tunggal, seperti yang dituliskan dalam persamaan 2.48. Selanjutnya M_{u2} dapat dihitung dengan mengasumsikan tulangan tekan, A'_s sudah luluh, yaitu sebagai berikut:

$$M_{u2} = \phi A_{s2}f_y(d-d') = \phi A'_s f_y(d-d') \dots \dots \dots (2.51)$$

Dalam hal ini $A_{s2} = A'_s$ menghasilkan gaya yang sama besar namun berlawanan arah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Dan pada akhirnya momen nominal total dari suatu balok bertulang rangkap diperoleh dengan menjumlahkan $M_{u1} + M_{u2}$. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[A_{s1} \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \right] \dots \dots \dots (2.52)$$

Luas total tulangan baja tarik yang digunakan adalah jumlah dari A_{s1} dan A_{s2} , sehingga:

$$A_{s1} = A_s - A_s' \dots\dots\dots (2.53)$$

Selanjutnya persamaan 2.49 dan 2.52 dapat dituliskan pula dalam bentuk:

$$a = \frac{(A_s - A_s')f_y}{0,85f_cxb} \dots\dots\dots (2.54)$$

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[(A_s - A_s') \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right] \dots\dots\dots (2.55)$$

Serta diperoleh pula syarat batas maksimum rasio tulangan, yaitu:

$$(p - p') < p_{maks} = p_b \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,008} \right) \dots\dots\dots (2.56)$$

Dalam analisis yang sudah dilakukan, digunakan asumsi bahwa tulangan tekan sudah luluh. Dari gambar 2.5, apabila tulangan tekan sudah luluh maka dipenuhi:

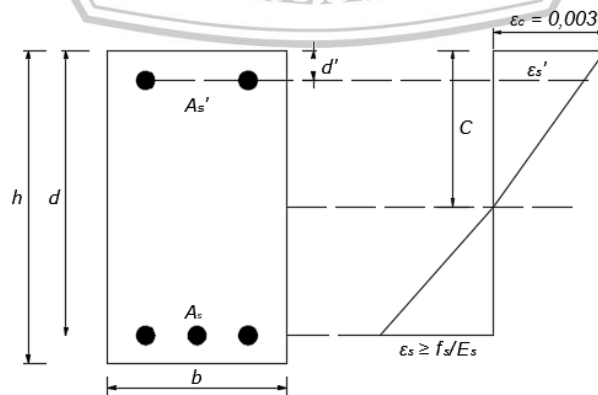
$$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

Dari kesamaan segitiga di atas sumbu netral, serta menggunakan $E_s = 200.000$ MPa, maka:

$$\frac{c}{d'} = \frac{0,003}{0,003 - \frac{f_y}{E_s}} = \frac{600}{600 - f_y}$$

Atau

$$c = \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) d' \dots\dots\dots (2.57)$$



Gambar 2.5 Diagram regangan balok beban bertulangan rangkap (Sumber: Setiawan, 2016:49)

Maka diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$(p - p')b.d.f_y = 0,85.f_c'.a.b$$

Atau

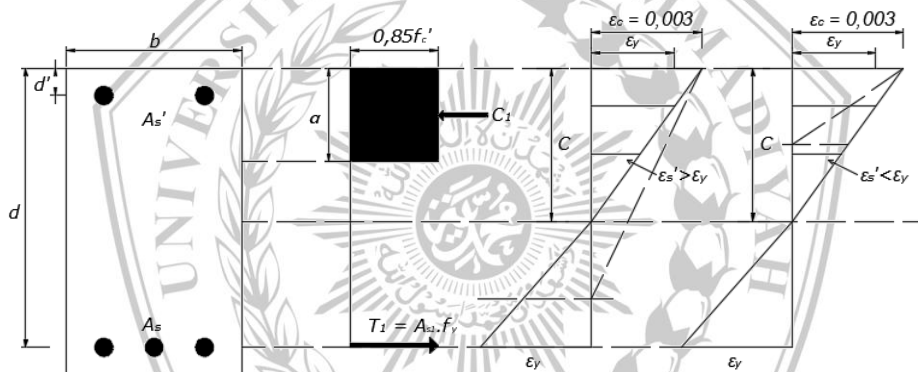
$$(p - p') = 0,85 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{a}{d} \right) \dots \dots \dots (2.58)$$

Dengan mengingat pula hubungan $a = \beta_1.c$, serta dari persamaan 2.57, maka diperoleh persamaan :

$$a = \beta_1.c = \beta_1 \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) d' \dots \dots \dots (2.59)$$

Persamaan 2.59 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$(p - p') = 0,85. \beta_1 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{d'}{d} \right) \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) = K \dots \dots \dots (2.60)$$



Gambar 2.6 Balok dengan tulangan tekan: (a) sudah luluh; (b) belum luluh
(Sumber: Setiawan, 2016:50)

Selain itu, dari persamaan 2.60 dapat diturunkan suatu syarat pemeriksaan apakah tulangan tekan sudah luluh atau belum, yaitu:

$$(p - p') \geq 0,85. \beta_1 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{d'}{d} \right) \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) = K \dots \dots \dots (2.61)$$

Nilai K untuk beberapa nilai f_c' dan f_y didapatkan dari tabel 2.4, yaitu sebagai berikut.

Tabel 2.4. Nilai K untuk pemeriksaan keluluhan tulangan beton

f_c' (MPa)	f_y (MPa)	β_1	K	K (dengan $d'=50$ mm)
20	400	0,850	0,1084(d'/d)	5,4188/ d
25	400	0,850	0,1355(d'/d)	6,7734/ d
30	400	0,850	0,1599(d'/d)	7,9943/ d
35	400	0,850	0,1785(d'/d)	8,9250/ d
40	400	0,764	0,1948(d'/d)	9,7410/ d

(Sumber: Setiawan, 2016:51)

Sedangkan pada tulangan belum luluh apabila:

$$(p - p') \leq 0,85\beta_1 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{d'}{d} \right) \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) = K \dots\dots\dots (2.62)$$

Tulangan baja tarik akan luluh sebelum beton mencapai regangan maksimumnya yaitu sebesar 0,003 dan regangan pada tulangan tekan, ϵ_s' belum mencapai ϵ_y pada saat terjadi keruntuhan. Luluhnya tulangan tekan juga dipengaruhi oleh letaknya terhadap serat terluar d' . Semakin tinggi rasio d'/c artinya tulangan tekan semakin dekat dengan sumbu netral, maka semakin kecil kemungkinan tulangan tekan mencapai kuat luluhnya.

Dari gambar 2.5 dengan menggunakan perbandingan segitiga, diperoleh:

$$\epsilon_s' = 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right)$$

$$f_s' = E_s \cdot \epsilon_s' = 200.000(0,003) \left(\frac{c-d'}{c} \right) = 600 \left(\frac{c-d'}{c} \right)$$

Dengan memperhitungkan luas beton yang ditempati oleh tulangan baja, maka dapat dituliskan rumus untuk besarnya gaya tekan pada tulangan C_s dan gaya tekan pada beton C_c , yaitu sebagai berikut:

$$C_s = A_s'(f_s' - 0,85 \cdot f_c') = A_s' \left[600 \left(\frac{c-d'}{c} \right) - 0,85 \cdot f_c' \right]$$

$$C_s = 0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot cb$$

Karena $T = A_s f_y = C_s + C_c$, maka:

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot cb + A_s' \left[600 \left(\frac{c-d'}{c} \right) - 0,85 \cdot f_c' \right]$$

Maka persamaan diatas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$(0,85f_c' \cdot \beta_1 \cdot b)c^2 + [(600 \cdot A_s') - (0,85f_c' \cdot A_s')]c - 600 \cdot A_s' \cdot d' = 0 \dots\dots\dots (2.63)$$

Persamaan diatas dapat disimpulkan dengan:

$$K_1 c^2 + K_2 c + K^3 = 0 \dots\dots\dots (2.64)$$

Dengan

$$K_1 = 0,85f_c' \cdot \beta_1 \cdot b$$

$$K_2 = A_s' (600 - 0,85f_c') - A_s \cdot f_y$$

$$K_3 = 600 \cdot A_s' \cdot d'$$

Nilai c dalam persamaan 2.64 dapat dihitung dengan rumus ABC sederhana, yaitu:

$$c = \frac{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \dots\dots\dots (2.65)$$

Dengan diketahui c , f_s' , a , C_c , dan C_s dapat hitung, demikian pula dengan kuat momen rencana penampang, yaitu:

$$\phi M_n = \phi \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \dots\dots\dots (2.66)$$

Bila tulangan tekan belum luluh, $f_s' < f_y'$, maka luas total tulangan tarik yang dibutuhkan untuk suatu penampang persegi adalah:

$$Maks A_s = p_{maks} \cdot b \cdot d + A_s' \frac{f_s'}{f_y} = b \cdot d \left(p_{maks} + \frac{p' f_s'}{f_y} \right) \dots\dots\dots (2.67)$$

Atau jika dinyatakan dalam rasio tulangan, maka persamaan 2.67 dapat dibagi dengan $b \cdot d$ yaitu:

$$Maks p = Maks \frac{A_s}{b} \cdot d \leq p_{maks} + \frac{p' f_s'}{f_y} \dots\dots\dots (2.68)$$

Atau

$$p - \frac{p' f_s'}{f_y} < p_{maks} \dots\dots\dots (2.68)$$

2.4.4 Perencanaan Tulangan Geser

Berdasarkan SNI 2847:2013 kebutuhan perencanaan tulangan geser ditentukan sebagai berikut:

1. Menghitung gaya geser ultimit, V_u dari beban terfaktor yang bekerja pada struktur. Nilai V_u yang diambil sebagai dasar desain adalah nilai V_u pada lokasi penampang kritis, yaitu sejarak d dari muka tumpuan.
2. Menghitung nilai ϕV_c dari persamaan:

$$\phi V_c = \phi (0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d) \dots\dots\dots (2.69)$$

Dengan nilai $\phi = 0,75$

3. Memeriksa nilai V_u

- Jika nilai $V_u < \frac{1}{2}\phi V_c$, tidak dibutuhkan tulangan geser
 - Jika $\frac{1}{2}\phi V_c < V_u \leq \phi V_c$, dibutuhkan tulangan geser minimum. Dapat dipasang tulangan sengkang vertikal berdiameter 10 mm dengan jarak maksimum ditentukan pada langkah 7
 - Jika $V_u > \phi V_c$ tulangan geser harus disediakan sesuai langkah 4 hingga 8
4. Jika $V_u > \phi V_c$ hitung gaya geser yang harus dipikul oleh tulangan geser adalah:

$$V_u = \phi V_c + \phi V_s$$

Atau

$$V_s = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi} \dots\dots\dots (2.70)$$

5. Menghitung nilai V_{c1} dan V_{c2} sebagai berikut:

$$V_{c1} = 0,33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.71)$$

$$V_{c2} = 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.72)$$

Apabila V_s lebih kecil daripada V_{c2} , maka proses desain dapat dilanjutkan ke langkah berikutnya, namun bila V_s lebih besar dari V_{c2} maka ukuran penampang harus diperbesar.

6. Menghitung jarak tulangan sengkang berdasarkan persamaan:

$$S_1 = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{V_s} \dots\dots\dots (2.73)$$

7. Menentukan jarak maksimum tulangan sengkang sesuai dengan persyaratan dalam SNI 2847:2013. Jarak maksimum tersebut diambil dari nilai terkecil antara s_2 dan s_3 yaitu berikut ini:

$$a. \quad s_2 = \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm, jika } V_s \leq V_{c1} = 0,33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.74)$$

$$s_2 = \frac{d}{4} \leq 300 \text{ mm, jika } V_{c1} < V_s \leq V_{c2} = 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.75)$$

$$b. \quad s_3 = \frac{A_v \cdot f_{yt}}{0,35 b_w} \geq \frac{A_v \cdot f_{yt}}{0,062 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w} \dots\dots\dots (2.76)$$

8. Apabila nilai s_1 yang dihitung dalam langkah 6 lebih kecil dari s_{maks} (nilai terkecil antara s_2 dan s_3), maka gunakan jarak sengkang vertikal s_1 dan jika $s_1 > s_{maks}$ maka gunakan s_{maks} sebagai jarak antar tulangan sengkang.

Dimana:

V_u = gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau

V_n = kekuatan geser nominal

V_s = kekuatan geser nominal pada tulangan geser

A_v = luas tulangan geser

f_y = kuat leleh tulangan

f_c' = mutu beton

d = tinggi efektif balok

s = jarak antar sengkang

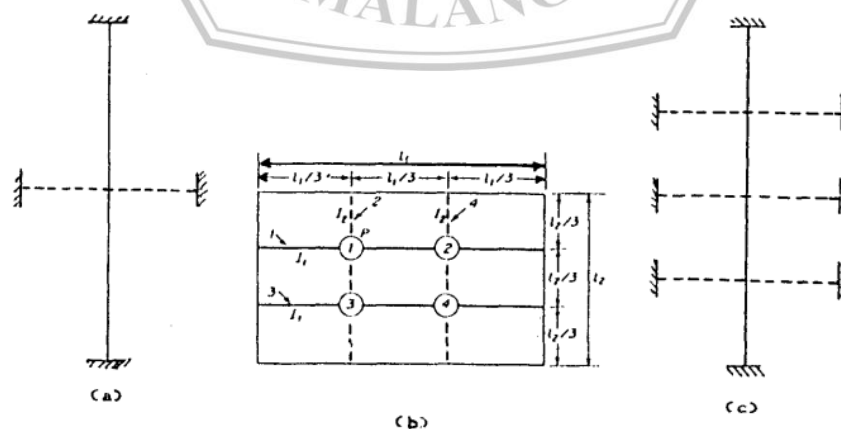
b_w = lebar balok

2.5 Balok Grid

Menurut Puspantoro (1993:25) dari bentuk dan sistem balok silang yang membentuk segmen-segmen wafel, maka pelat dengan sistem grid mempunyai kekuatan jauh lebih besar dibandingkan dengan pelat datar biasa. Dari bentuk dan posisi silang baloknya, struktur grid dapat dibedakan antara lain sebagai berikut:

2.5.1 Sistem Grid Persegi

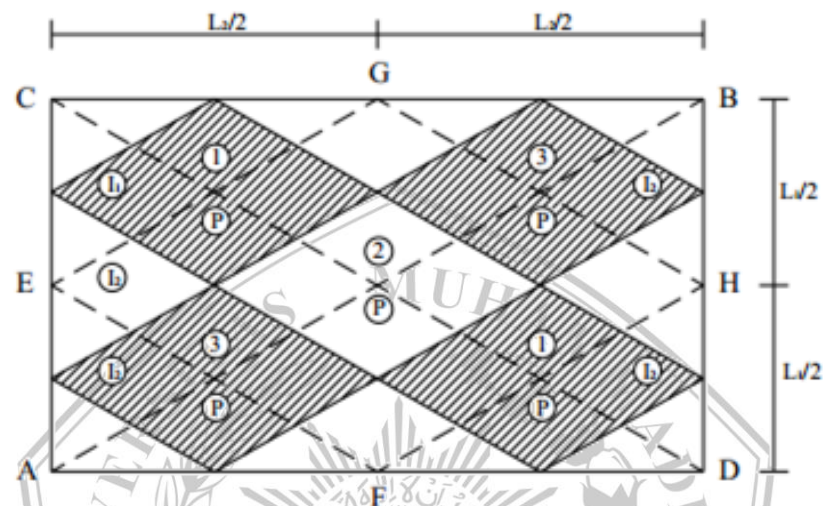
Menurut Puspantoro (1993:26) sistem grid persegi dibentuk oleh dua buah balok yang saling bersilang tegak lurus satu sama lain. Dapat terdiri hanya satu balok atau beberapa balok, yang memiliki sifat utama mendistribusikan beban dalam dua arah atau lebih.



Gambar 2.7 Sistem grid persegi (Sumber: Puspantoro, 1993:26)

2.5.2 Sistem Grid Diagonal (Miring)

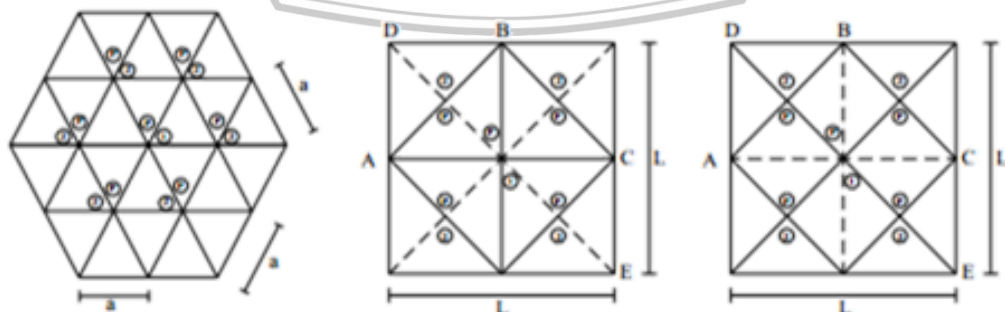
Menurut Puspantoro (1993:26) pada sistem ini arah balok saling tegak lurus, tetapi miring sehingga membentuk diagonal yang saling berpotongan. Meskipun balok-balok diagonal ini memiliki panjang yang tidak sama, tetapi selalu mempunyai panjang yang sebanding.



Gambar 2.8 Sistem grid diagonal (Sumber:Puspantoro, 1993:27)

2.5.3 Sistem Grid Majemuk

Menurut Puspantoro (1993:28) pada sistem grid majemuk, satu titik simpul dapat dilewati oleh lebih dari satu balok atas atau balok bawah. Sehingga beban terpusat yang bekerja pada titik simpul akan menjadi P/n untuk masing-masing balok (n = jumlah balok atas yang lewat titik simpul tersebut).



Gambar 2.9 Sistem grid majemuk (Sumber: Puspantoro, 1993:28)

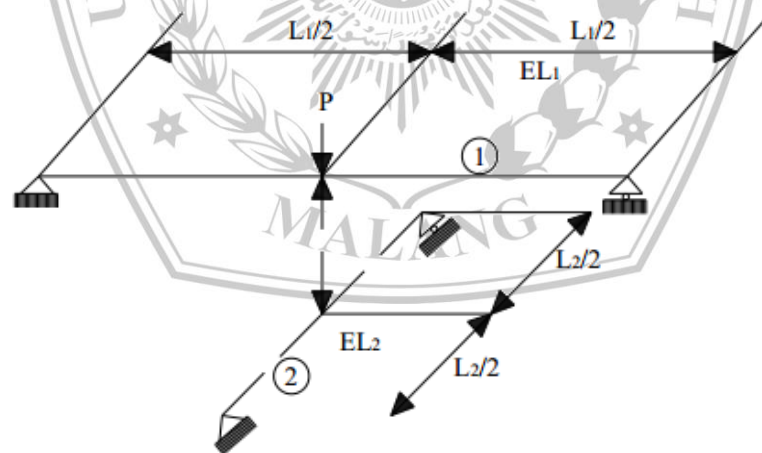
2.6 Dasar-Dasar Perencanaan Balok Grid

Menurut Puspantoro (1993:2) untuk menganalisa struktur grid ada dua metode, yaitu metode gaya dan metode kekakuan. Metode gaya dapat diselesaikan dengan bantuan tabel makowsky sehingga caranya cukup sederhana. Sedangkan analisis dengan metode kekakuan mempunyai langkah yang lebih panjang dan diperlukan pengetahuan dasar aljabar linier matrix dan elastisitas.

2.6.1 Metode Gaya

Menurut Puspantoro (1993:3) pada analisis grid dengan metode gaya, pengaruh puntir tidak diperhitungkan. Sifat dan karakteristik dari pemindahan beban pada dua arah digambarkan secara jelas oleh kinerja dari dua balok yang saling tegak lurus dan saling mempengaruhi sehingga lendutan kedua balok tersebut dapat dianggap sama.

Pada gambar 5 dapat kita lihat suatu sistem struktur balok grid. Kedua balok silang tersebut dapat dinyatakan sebagai balok atas dengan bentang L_1 dan balok bawah dengan bentang L_2 . Sedangkan pada titik silang kedua balok di tengah bentang bekerja gaya sebesar P .



Gambar 2.10 Balok silang pada sistem grid (Sumber: Puspantoro, 1993:3)

Struktur grid yang terdiri dari banyak balok sehingga banyak pula titik potongnya maka untuk mencari reaksi pada tiap titik potongnya dapat digunakan tabel makowski.

Tabel 2.5 Tabel makowski

<i>N</i>	δ pada <i>k</i>	Unit beban satuan yang diterapkan pada I					Faktor I^2/EI
		1	2	3	4	5	
2	1	1					1/48
3	1	8					1/468
	2	7	8				
4	1	9					1/768
	2	11	16				
	3	7	11	9			
5	1	3					1/3750
	2	45	72				
	3	40	68	72			
	4	23	40	45	23		
	1	25					
6	2	38	64				1/3888
	3	39	69	81			
	4	31	56	69	64		
	5	17	31	39	38	25	

(Sumber: Puspantoro, 1993:8)

Menurut Puspantoro (1993:4) dengan menyatakan bahwa momen inersia dari kedua balok adalah I_1 dan I_2 dengan modulus elastisitas yang sama (E) pada gambar diatas, maka didapatkan persamaan yaitu sebagai berikut:

$$d_1 = \frac{(P-X).I_1^3}{48.E.I_1} \dots\dots\dots (2.77)$$

$$d_2 = \frac{X.I_2^3}{48.E.I_2} \dots\dots\dots (2.78)$$

Jika $d_1 = d_2$ maka didapatkan nilai X yaitu:

$$X = \frac{P}{1 + \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{I_1}{I_2}\right)} \dots\dots\dots (2.79)$$

Sedangkan untuk momen di tengah bentang yaitu:

$$M \text{ balok-a} = \frac{(P-X)}{2} \cdot \frac{I_1}{2} = \frac{(P-X).I_1}{4} \dots\dots\dots (2.80)$$

$$M \text{ balok-b} = \frac{X}{2} \cdot \frac{I_2}{2} = \frac{X.I_2}{4} \dots\dots\dots (2.81)$$

2.6.2 Metode Kekauan

Menurut Puspantoro (1993:8) metode kekakuan adalah salah satu cara menganalisa struktur dengan cara memberikan lendutan sebesar satu satuan di titik-

titik diskrit yang akan dicari. Maka dengan demikian akan didapatkan hubungan antara gaya yaitu sebagai berikut:

$$M_a = \frac{6.E.I.\delta}{L^2} \dots\dots\dots (2.82)$$

$$M_b = \frac{6.E.I.\delta}{L^2} \dots\dots\dots (2.83)$$

$$R_a = \frac{12.E.I.\delta}{L^3} \dots\dots\dots (2.84)$$

$$M_a = \frac{-12.E.I.\delta}{L^3} \dots\dots\dots (2.85)$$

2.7 Kolom

Berdasarkan SNI 2847:2013 kolom harus direncanakan guna menahan gaya aksial dan momen maksimum dari beban terfaktor pada semua lantai atau atap. Kondisi pembebanan yang memberikan rasio momen maksimum terhadap beban aksial juga harus ditinjau.

2.7.1 Jenis Kolom

Menurut Dipohusodo (1994) ada tiga jenis kolom yaitu:

1. Kolom menggunakan pengikat sengkang lateral, yaitu kolom beton yang ditulangi dengan batang tulangan pokok memanjang dengan pengikat sengkang kearah lateral pada jarak spasi tertentu. Tulangan ini berfungsi agar tulangan pokok memanjang tetap kokoh pada tempatnya.
2. Kolom menggunakan pengikat spiral, yaitu kolom beton yang ditulangi dengan batang tulangan pokok memanjang dengan pengikat spiral yang dililitkan keliling membentuk *heliks* menerus di sepanjang kolom.
3. Stuktur kolom komposit, yaitu komponen struktur yang diperkuat profil baja pada arah memanjang atau tanpa diberi tulangan pokok memanjang.

2.7.2 Kolom pendek

Kolom pendek merupakan jenis kolom yang mengalami keruntuhan akibat gaya tekan atau luluhnya tulangan baja di bawah kapasitas ultimit dari kolom tersebut. Apabila kolom runtuh dengan kegagalan pada materialnya yaitu hancurnya beton atau luluhnya tulangan baja, maka kolom digolongkan sebagai kolom pendek (Nawi, 1990).

Kondisi seimbang penampang kolom dapat terjadi pada kondisi beban P_b yang bekerja pada penampang dan dapat menghasilkan regangan sebesar 0,003 pada serat tekan beton, dan pada saat yang bersamaan pula tulangan baja mengalami luluh, atau regangannya mencapai $\epsilon_y = f_y/E_s$. Jika beban eksentris yang bekerja lebih besar daripada P_b , dapat mengakibatkan kolom mengalami keruntuhan tekan. Sedangkan apabila beban eksentris yang bekerja lebih kecil daripada P_b kolom akan mengalami keruntuhan tarik. Analisis penampang kolom pada keruntuhan seimbang dilakukan sebagai berikut:

1. Misalkan c merupakan jarak dari serat tekan beton terluar ke sumbu netral, maka dari diagram regangan diperoleh hubungan sebagai berikut:

$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003+f_y/E_s}$ untuk nilai $E_s = 200.000$ MPa, maka:

$$c_b = \frac{600}{600+f_y} \cdot d \dots\dots\dots (2.86)$$

Tinggi dari balok tegangan ekuivalen adalah:

$$a_b = \beta_1 c_b = \frac{600}{600+f_y} \cdot \beta_1 \cdot d \dots\dots\dots (2.87)$$

Dengan $\beta_1 = 0,85$ untuk $f'_c = 30$ MPa, dan berkurang 0,05 setiap kenaikan f'_c sebesar 7 MPa.

2. Dari kesetimbangan gaya dalam arah horizontal diperoleh:

$$\Sigma H = 0$$

$$P_b - C_c - C_s + T = 0$$

Dengan:

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot a_b \cdot b \dots\dots\dots (2.88)$$

$$T = A_s f_y \dots\dots\dots (2.89)$$

$$C_s = A_s' (f'_s - 0,85 f'_c) \dots\dots\dots (2.90)$$

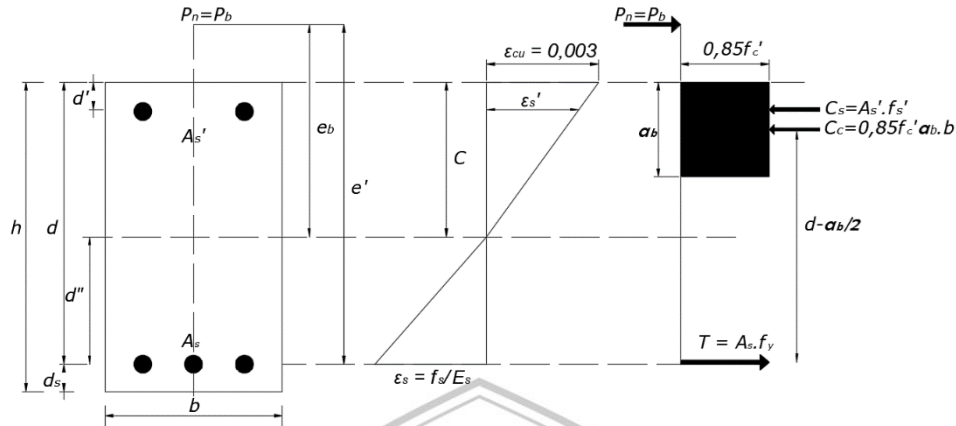
Nilai f_s yang digunakan sama dengan nilai f_y apabila tulangan tekan sudah luluh, maka:

$$f'_s = 600 \left(\frac{c_b - d'}{c_b} \right) \leq f_y \dots\dots\dots (2.91)$$

Sehingga persamaan kesetimbangan gaya arah horizontal dapat dituliskan kembali dengan persamaan:

$$P_b = 0,85 f'_c \cdot a_b \cdot b + A_s' (f'_s - 0,85 f'_c) - A_s f_y \dots\dots\dots (2.92)$$

3. Nilai e_b ditentukan dengan cara mengambil jumlah momen terhadap pusat berat plastis. Maka didapatkan persamaan:



Gambar 2.11 Kondisi keruntuhan seimbang penampang kolom persegi
(Sumber: Setiawan, 2016:162)

$$P_b x e_b = C_c \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T d'' \quad (2.93)$$

Atau

$$P_b x e_b = M_b \quad (2.94)$$

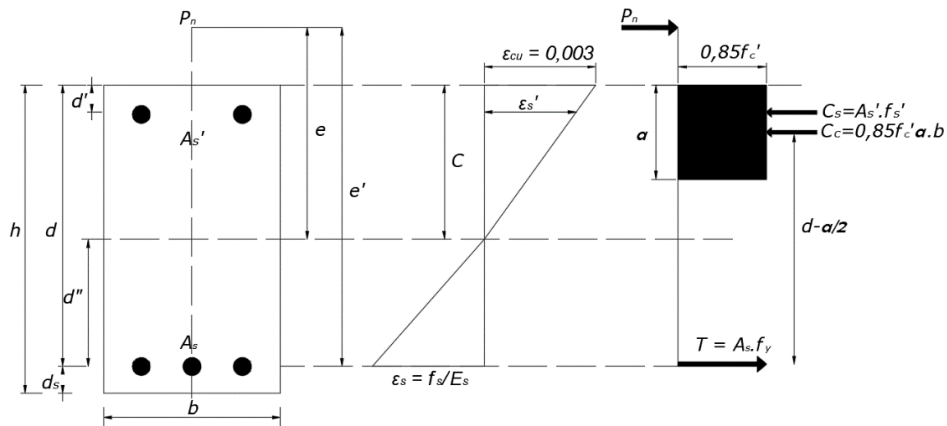
$$M_b = 0,85f'_c a_b b \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + A'_s (f_y - 0,85f'_c) (d - d' - d'') + A_s f_y d''$$

Nilai eksentrisitas pada kondisi seimbang diperoleh dari persamaan:

$$e_b \frac{M_b}{P_b} \quad (2.95)$$

2.7.3 Penampang Kolom dengan Beban Eksentris

Terdapat dua kasus keruntuhan kolom yaitu keruntuhan tekan atau keruntuhan tarik. Guna melakukan analisis terhadap dua kasus tersebut, maka dapat digunakan dua buah persamaan dasar yaitu, jumlah gaya dalam arah horizontal/vertikal = 0 dan jumlah momen terhadap sembarang momen = 0.



Gambar 2.12 Kolom penampang persegi dengan beban eksentris (Sumber: Setiawan, 2016:164)

Dari gambar 2.12 diatas, maka dapat dituliskan beberapa persamaan berikut:

$$1. \Sigma H = 0 \quad P_n - C_c - C_s + T = 0 \quad \dots\dots\dots (2.96)$$

Dengan:

$$C_c = 0,85.f_c'.a.b$$

$$T = A_s.f_y \quad (\text{jika tulangan tarik luluh, } f_s = f_y)$$

$$C_s = A_s' (f_s' - 0,85.f_c') \quad (\text{jika tulangan tekan luluh, } f_s' = f_y)$$

2. Mengambil momen terhadap A_s :

$$P_n e' - C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) - C_s (d - d') = 0 \quad \dots\dots\dots (2.97)$$

Dengan $e' = e + d''$, dan $e' = e + d - h/2$ untuk penampang dengan tulangan simetris dan jika d'' adalah jarak dari pusat plastis ke pusat tulangan tarik. Maka:

$$P_n = \frac{1}{e'} \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) - C_s (d - d') \right] \quad \dots\dots\dots (2.98)$$

Mengambil momen terhadap C_c :

$$P_n \left[e' - \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] - T \left(d - \frac{a}{2} \right) - C_s \left(\frac{a}{2} - d' \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.99)$$

$$P_n = \frac{T \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{a}{2} - d' \right)}{\left(e' + d - \frac{a}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.100)$$

Apabila $A_s = A_s'$ dan $f_s = f_s' = f_y$ maka:

$$P_n = \frac{A_s.f_y(d-d')}{\left(e' + d - \frac{a}{2} \right)} = \frac{A_s.f_y(d-d')}{\left(e - \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.101)$$

$$A_s = A_s' = \frac{P_n \left(e - \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right)}{f_y(d-d')} \quad \dots\dots\dots (2.102)$$

2.7.4 Keruntuhan Tarik

Keruntuhan tarik terjadi ketika penampang kolom diberi beban tekan eksentris dengan eksentrisitas yang besar. Kolom akan mengalami keruntuhan yang disebabkan oleh luluhnya tulangan baja dan hancurnya beton pada saat regangan tulangan baja melampaui $\varepsilon_y (= f_y/E_s)$. Untuk melakukan prediksi awal apakah terjadi keruntuhan tarik atau tekan yaitu apabila $e > d$, dapat diasumsikan terjadi keruntuhan tarik. Prosedur analisis dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Bila terjadi keruntuhan tarik, maka tulangan tarik luluh dan tegangannya adalah

$$f_s = f_y. \text{ asumsikan bahwa tegangan pada tulangan tekan adalah } f_s' = f_y$$

2. Mengevaluasi P_n dalam kondisi kesetimbangan:

$$P_n = C_c + C_s - T$$

Dengan:

$$C_c = 0,85.f_c'.a_b.b$$

$$T = A_s.f_y$$

$$C_s = A_s' (f_s' - 0,85.f_c')$$

3. Menghitung P_n :

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d')$$

Dengan $e' = e + d''$, dan $e' = e + d - h/2$ serta $A_s = A_s'$

4. Menyamakan P_n dari langkah 2 dan 3

$$C_c + C_s - T = \frac{1}{e'} \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right]$$

Persamaan ini akan menghasilkan persamaan kuadrat untuk a . Untuk mendapatkan nilai a dengan cara mensubstitusikan C_c , C_s , dan T

5. Maka dari persamaan pada langkah 4 dapat disederhanakan menjadi:

$$As^2 + Ba + C = 0 \dots\dots\dots (2.103)$$

$$a = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

Dengan:

$$A = 0,425.f_c'.b$$

$$B = 0,85.f_c'.b(e' - d) = 2A(e' - d)$$

$$C = A_s' (f_s' - 0,85.f_c')(e' - d + d') - A_s.f_y.e'$$

6. Memeriksa apakah tulangan tekan sudah luluh jika $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$
7. Menggunakan faktor reduksi ϕ sebesar 0,65 sampai 0,90

2.7.5 Keruntuhan Tekan

Penampang kolom akan mengalami keruntuhan tekan apabila gaya tekan P_n melebihi gaya tekan dalam kondisi seimbang P_b , atau apabila eksentrisitas $e = M_n/P_n$ lebih kecil daripada nilai eksentrisitas dalam kondisi seimbang e_b (Setiawan, 2016:167). Dalam kondisi ini regangan beton akan mencapai 0,003 sedangkan nilai dari regangan pada tulangan baja akan kurang dari ε_y . Sebagian penampang akan berada dalam kondisi tekan. Pergerakan sumbu netral akan mendekati tulangan tarik kemudian menambah luas daerah tekan beton dan mengakibatkan jarak sumbu netral dari serat tekan beton akan melebihi jaraknya dalam kondisi seimbang ($c > c_b$). Nilai dari beban tekan nominal P_n dapat dihitung dengan menggunakan prinsip-prinsip dasar kesetimbangan gaya. Prosedur analisis dari penampang kolom yang mengalami keruntuhan tekan dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Menghitung jarak sumbu netral untuk penampang dalam kondisi seimbang c_b dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} \cdot d \dots \dots \dots (2.104)$$

2. Mengevaluasi P_n dari kesetimbangan gaya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = C_c + C_s - T \dots \dots \dots (2.105)$$

3. Mengevaluasi P_n dengan mengambil momen terhadap A_s , persamannya adalah sebagai berikut:

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \dots \dots \dots (2.106)$$

Dengan $e' = e + d''$ (atau $= e + d - h/2$, jika $A_s = A'_s$), $C_c = 0,85 f'_c a_b b$, $C_s = A'_s (f'_s - 0,85 f'_c)$ dan $T = A_s f_s$

4. Mengasumsikan suatu nilai c sehingga $c > c_b$. Menghitung $a = \beta_1 c$, dengan asumsi $f'_s = f_y$
5. Menghitung nilai f'_s berdasarkan asumsi nilai c , maka:

$$f'_s = \varepsilon_s E_s = 600 \left(\frac{c_b - d'}{c_b} \right) \leq f_y$$

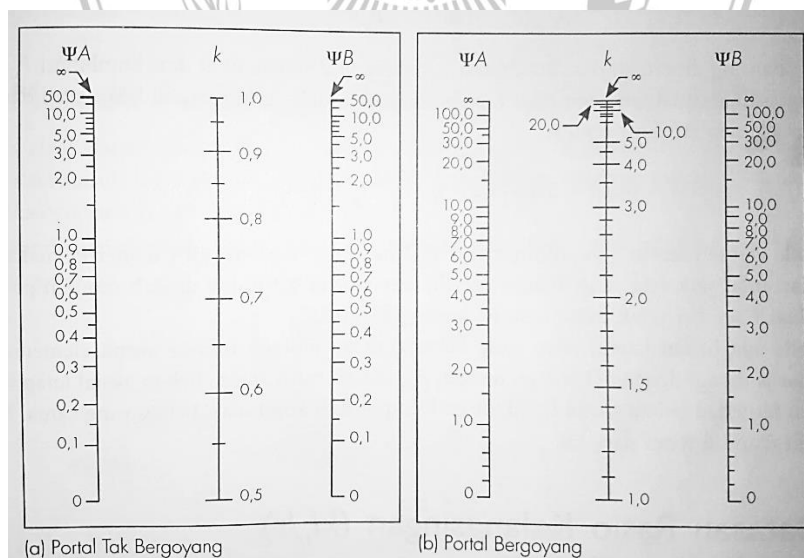
6. Memeriksa apakah tulangan tekan sudah luluh, jika belum maka f'_s dihitung sebagai berikut:

$$f'_s = 600 \left(\frac{c_b - d'}{c_b} \right) \leq f_y$$

2.7.3 Kolom Panjang

Kolom panjang merupakan jenis kolom yang mengalami keruntuhan akibat oleh faktor tekuk kolom tersebut, maka dari itu perencanaannya harus memperhitungkan rasio kelangsingan dan efek tekuk agar kapasitasnya berkurang dibandingkan dengan kolom pendek. Kolom dengan tumpuan kedua ujungnya berupa sendi dengan memiliki panjang tak terkekang sebesar I_u dan jarak antara kedua titik yang memiliki momen sama dengan nol adalah I_u juga yang memiliki faktor panjang efektif sebesar $k = I_u/I_u = 1,0$. Jika kedua tumpuan ujung merupakan jepit dan momen nol terjadi pada jarak $I_u/4$ dari kedua tumpuan, maka nilai dari $k = 0,5 I_u/I_u = 0,5$. Nilai dari k juga dapat ditentukan dengan nomogram yaitu pada gambar 2.13, dengan terlebih dahulu menghitung faktor tahanan ujungnya yaitu ψ_A dan ψ_B pada sisi atas dan bawah dari kolom, yaitu:

$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{I_c} \text{kolom}}{\sum \frac{EI}{I} \text{balok}} \dots \dots \dots (2.107)$$



Gambar 2.13 Nomogram untuk menentukan faktor panjang efektif, k
(Sumber: Setiawan, 2016:199)

Untuk modulus elastisitas beton bertulang diperoleh dengan menggunakan persamaan empiris sebagai berikut:

$$E_c = 0,043 \cdot w^{1,5} \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.108)$$

Atau

$$E_c = 4.700 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.109)$$

Yang mana menggunakan modulus elastisitas untuk tulangan bajanya sebesar $E_s = 200.000$ MPa.

Untuk menghitung faktor ψ , maka nilai El dari balok dan kolom juga harus diperhitungkan, dan momen inersia pada penampang dapat direduksi yang dicantumkan dalam peraturan SNI 2847:2013 yaitu sebagai berikut:

a. Elemen struktur tekan

$$\text{Kolom} \quad I = 0,70I_g$$

$$\text{Dinding Geser (tidak retak)} \quad I = 0,70I_g$$

$$\text{Dinding Geser (retak)} \quad I = 0,35I_g$$

b. Elemen struktur lentur

$$\text{Balok} \quad I = 0,35I_g$$

$$\text{Pelat datar dan slab datar} \quad I = 0,25I_g$$

Dengan I_g merupakan momen inersia bruto dari penampang. Sebagai alternatifnya, untuk mengetahui momen inersia dari elemen struktur tekan dan lentur dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

Untuk elemen struktur tekan persamaannya adalah:

$$I = \left(0,80 + 0,25 \frac{A_{st}}{A_g} \right) \left(1 - \frac{M_u}{P_u h} - 0,5 \frac{P_u}{P_0} \right) I_g \leq 0,875 I_g \dots\dots\dots (2.110)$$

Dengan P_u dan M_u didapatkan dari kombinasi beban yang ditinjau, atau dari kombinasi dari P_u dan M_u yang akan menghasilkan nilai terkecil untuk I . Nilai dari I sendiri tidak perlu diambil lebih kecil dari $0,35I_g$.

Untuk elemen struktur lentur persamaannya adalah:

$$I = (0,10 + 25\rho)(1,2 - 0,2 \frac{b_w}{d}) I_g \leq 0,5 I_g \dots\dots\dots (2.111)$$

Berdasarkan SNI 2847:2013 rasio kelangsingan kolom dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Komponen struktur kompresi yang tidak tercampur untuk goyangan lateral yaitu:

$$\frac{k.l_u}{r} \leq \frac{44}{2} \dots\dots\dots (2.112)$$

- b. Komponen struktur dikompresi nongol terhadap goyangan lateral (elemen struktur tekan tak bergoyang) yaitu:

$$\frac{k.l_u}{r} \leq 34 - 12 \cdot \left[\frac{M_1}{M_2} \right] \leq 40 \dots\dots\dots (2.113)$$

Dimana:

k = faktor panjang efektif kolom

l_u = panjang kolom yang ditopang

r = jari-jari potongan lintang kolom

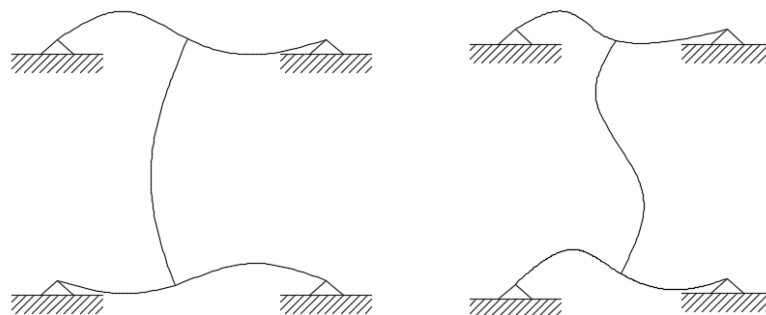
2.7.4 Metode Perbesaran Momen Portal Tak Bergoyang

Langkah awal dalam mendesain kolom panjang adalah dengan menentukan apakah portal yang akan dianalisis termasuk portal yang berjenis bergoyang atau tidak (Setiawan, 2016:201). Elemen struktur kolom pada suatu portal dapat disebut tak bergoyang apabila:

1. Pertambahan momen pada ujung kolom hasil analisis di orde kedua tidak lebih dari 5% terhadap hasil analisis orde pertama

$$Q = \frac{\sum P_u \Delta_o}{V_{us} I_c} \leq 0,05 \dots\dots\dots (2.114)$$

- 2.



Gambar 2.14 (a) Kelengkungan tunggal; (b) Kelengkungan ganda (Sumber: Setiawan, 2016:201)

Yang mana $\sum P_u$ dan V_{us} merupakan beban vertikal total dan gaya geser lantai total pada tingkat yang ditinja, dan Δ_o merupakan simpangan relative antar

tingkat orde pertama pada tingkat yang ditinjau akibat dari V_u . Panjang I_c merupakan panjang elemen struktur kolom yang diukur dari as ke as titik kumpul pada portal.

Pengaruh kelangsingan pada elemen struktur tak bergoyang dapat diabaikan apabila rasio $kl_u/r < 34 - 12M_1/M_2 < 40$. Jika $kl_u/r < 34 - 12M_1/M_2$ maka pengaruh kelangsingannya harus diperhitungkan dengan salah satu metodenya dengan menggunakan metode perbesaran momen, yang prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Menentukan apakah kolom yang dianalisis termasuk bagian dari portal tak bergoyang, dan menentukan panjang tak terkekang I_u serta faktor panjang efektif k .

2. Menghitung kekakuan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$EI = \frac{0,2E_c I_g + E_s I_{se}}{1 + \beta_{dns}} \dots\dots\dots (2.115)$$

Atau

$$EI = \frac{0,4 E_c I_g}{1 + \beta_{dns}} \dots\dots\dots (2.116)$$

Dengan

$$E_c = 4.700 \sqrt{f'_c}$$

$$E_s = 200.000 \text{ MPa}$$

I_g = Momen inersia bruto penampang terhadap sumbu yang ditinjau

I_{se} = Momen inersia tulangan baja

$$\beta_{dns} = \frac{\text{beban tetap aksial terfaktor maksimum}}{\text{beban aksial terfaktor maksimum}} = \frac{1,2 D}{1,2 D + 1,6 L}$$

3. Menentukan besarnya beban tekuk Euler P_c dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl_u)^2} \dots\dots\dots (2.117)$$

Menggunakan nilai EI , k dan I_u yang diperoleh dari langkah 1 dan 2

4. Menghitung nilai dari C_m yang digunakan untuk menghitung faktor perbesaran momen, dengan persamaan:

$$C_m = 0,6 + \frac{0,4 M_1}{M_2} \geq 0,4 \dots\dots\dots (2.118)$$

Rasio M_1/M_2 bernilai positif untuk kelenkungan tunggal sedangkan untuk kelenkungan ganda adalah negatif. Untuk kolom yang memikul beban transversal diantara kedua tumpuannya, maka nilai dari C_m harus sama dengan 1,0.

5. Menghitung faktor perbesaran momen δ_{ns} dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0,75P_c}} \geq 10 \dots\dots\dots (2.119)$$

Dengan P_u merupakan beban aksial terfaktor yang bekerja dan P_c serta C_m telah dihitung dalam langkah 3 dan 4.

6. Mendesain kolom dengan beban aksial terfaktor P_u serta momen M_c yang besarnya adalah:

$$M_c = \delta_{ns} M_2$$

Dengan M_2 adalah momen ujung terfaktor yang terbesar.

7. M_2 yang harus diambil tidak kurang dari:

$$M_{2min} \geq P_u(15 + 0,03h)$$

2.7.4 Metode Perbesaran Momen Portal Bergoyang

Pada elemen struktur kolom yang merupakan bagian portal bergoyang jika nilai dari $kl_u/r < 22$ maka efek kelangsingan dapat diabaikan (Setiawan, 2016:205). Langkah - langkah untuk menentukan faktor perbesaran momen pada portal bergoyang adalah sebagai berikut:

1. Menentukan faktor panjang efektif, k dan panjang tak terkekang I_u
2. Menghitung EI , P_c dan C_m pada persamaan 2.115 hingga 2.118
3. Faktor perbesaran momen dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\delta_s = \frac{1}{1-Q} \geq 1,0 \dots\dots\dots (2.120)$$

Namun jika nilai $\delta_s > 1,5$, maka δ_s harus dihitung dengan menggunakan analisis orde kedua yaitu:

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma P_u}{0,75 \Sigma P_c}} \geq 10 \dots\dots\dots (2.121)$$

4. Menghitung momen ujung, M_1 dan M_2 yang telah diperbesar

$$M_1 = M_{1ns} + \delta_s M_{1s} \dots\dots\dots (2.123)$$

$$M_2 = M_{2ns} + \delta_s M_{2s} \dots \dots \dots (2.124)$$

5. Jika nilai $M_2 > M_1$ maka persamaan yang digunakan untuk desain kolom adalah:

$$M_c = M_{2ns} + \delta_s M_{2s} \dots \dots \dots (2.125)$$

6. Melakukan pendesainan elemen struktur tekan terhadap beban terfaktor P_u apabila:

$$\frac{l_u}{r} < \frac{35}{\sqrt{\frac{P_u}{f'_c A_g}}} \dots \dots \dots (2.126)$$

